

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ

УДК 539.1

С.І. Покутній,
доктор фізико-математичних наук, професор;
А.Ц. Франовський,
кандидат фізико-математичних наук, доцент;
О.К. Ткаченко,
кандидат фізико-математичних наук, доцент;
М.С. Покутній,
аспірант

(Житомирський державний університет імені Івана Франка)

ОПТИЧНА СПЕКТРОСКОПІЯ ЕКСИТОННИХ СТАНІВ У КВАЗІНУЛЬВИМІРНИХ СИСТЕМАХ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ. ВНЕСОК УКРАЇНСЬКИХ ФІЗИКІВ

Аналізується сучасний стан та перспективи розвитку оптичної спектроскопії напівпровідникових наносистем. Наводяться проблеми теоретичної спектроскопії електронних станів квазінульвимірних наносистем, які потребують подальшого розвитку.

Інтенсивні дослідження квазінульвимірних напівпровідникових структур систем стимулюються як відкриттям ряду принципово нових фундаментальних явищ, так і наявністю великих прикладних можливостей (елементна база нанооптоелектроніки, нанофотоніки, лазерної техніки тощо). Тому нині широко вивчаються фізичні явища у низьковимірних системах, розробляються фізичні та хімічні методи дослідження та діагностики [1-9]. Сьогодні мікро- і нанооптоелектроніка вийшла на нанометровий рівень і інтенсивно розвивається далі. Світове визнання здобули своїми роботами українські наукові школи з експериментальної і теоретичної фізики низьковимірних напівпровідникових систем, засновані І.М. Ліфшицем, В.М. Аграновичем, В.С. Лашкар'овим, М.П. Лисицею, В.Г. Литовченком, М.Ф. Дейченком, М.Д. Глинчуком, А.П. Шпаком, С.І. Пекарем, М.Г. Находкіним, А.Г. Наумовцем, М.С. Бродиним, В.І. Сугаковим, М.В. Ткачем, Е.А. Пашицьким, І.В. Блонським.

Оптичні та електрооптичні властивості подібних гетерофазних систем значною мірою визначаються енергетичним спектром просторово обмеженої електроннодіркової пари (екситона) (українські фізики М.Ф. Дейген, М.Д. Глинчук (1963) [10], М.П. Лисиця, М.Р. Куліш (1966) [11], В.М. Агранович (1973) [12], В.Г. Литовченко (1976) [13], С.І. Покутній (1984) [14; 15], В.М. Ткач (1989) [16]). При цьому енергетичний спектр квазічастинок залежить від радіуса а напівпровідникової квантової точки (КТ). За цих умов вплив поверхні поділу КТ-діелектрична матриця може спричинити розмірне квантування енергетичного спектра електрона і дірки в КТ, пов'язане як з просторовим обмеженням області квантування, так і з поляризаційною взаємодією носіїв заряду з поверхнею КТ [1-9; 14-16].

Дискретність енергетичного спектра електронів і дірок у КТ використовується для створення оптичних нанолазерів та інших приладів з високою температурною стабільністю частоти генерації [1-9]. Розміри КТ а повинні бути в діапазоні кількох нанометрів, щоб енергетичні зазори, які виникають між квантоворозмірними рівнями електронів і дірок $\Delta E_{e(h)}$, були порядку кількох kT_0 при кімнатній температурі T_0 (де k – постійна Больцмана). Це дає можливість усунути основну проблему сучасної мікро- і нанооптоелектроніки – "розмивання" рівнів носіїв заряду в енергетичному інтервалі порядку kT , яке призводить до деградації властивостей приладів у разі підвищення робочої температури T [1-4].

Основна причина кардинальної різниці фізичних властивостей напівпровідникових квазінульвимірних систем від властивостей напівпровідникових матеріалів обумовлюється тим, що внаслідок просторового обмеження та нанорозмірів КТ вирішальну роль відіграє розмірне квантування спектрів квазічастинок, зокрема, екситонів [1-9].

Можливість, змінюючи радіус а КТ, варіювати енергетичним спектром носіїв заряду $E_{nl}^{e(h)}(a)$ (де n, l – головне і орбітальне квантові числа носіїв заряду), який до того ж має дискретну структуру, дає

змогу розв'язати загальну проблему керування оптичними фундаментальними параметрами в квазінульвимірних структурах і в приладах на їх основі: шириною забороненої зони, ефективними масами носіїв і їх рухливостями, показником заломлення та коефіцієнтом поглинання світла тощо [1-9; 14-20].

Такі гетероструктури привертають до себе увагу внаслідок їх нелінійних оптичних властивостей і перспектив застосування в нанооптоелектроніці та у квантовій електроніці (зокрема, як нових матеріалів, перспективних для створення елементів, що керують оптичними сигналами в інжекційних напівпровідникових нанолазерах і в оптичних бістабільних елементах та транзисторах) [1-9; 19; 20].

Прогрес у вивченні наносистем тісно пов'язаний з удосконаленням методів оптичної і автоіонної, тунельної, атомносилової спектроскопії, а також із розвитком теоретичних методів (зокрема, методів комп'ютерного моделювання).

Для визначення актуальних напрямів експериментальних досліджень наноструктур необхідно, хоча б у початковому наближенні, теоретично описати властивості досліджуваних об'єктів, щоб цілеспрямовано виявляти нові фізичні явища [1-9]. Оскільки оптичні властивості КТ визначаються переважно дискретними енергетичними спектрами кв; ізчастинок [1-9; 14-20], то основним завданням теорії на даному етапі є дослідження впливу розмірного квантування, різноманітних взаємодій (кулонівської, поляризаційної, електрон- і екситон-фононної, обмінної, спин-орбітальної і т.п.) та електричного і магнітного полів на спектри електронів, дірок та екситонів [1-9; 14-20].

Зазначимо деякі проблеми у дослідженні наносистем, які потребують, на наш погляд, подальшого розвитку експериментальними та теоретичними методами [1-9; 14-20]:

1. Більшість підходів до опису фізичних властивостей напівпровідникових КТ умовно можна поділити на дві групи [1-5]: 1) опис з позиції твердого тіла в рамках зонної теорії в її одноелектронному наближенні [1-5]; 2) опис з позиції окремого атома у рамках квантово-хімічного кластерного підходу, в якому КТ вважають за велику молекулу [1].

У рамках першого підходу КТ розглядали як нанокристал сферичної форми, що має періодичну кристалічну структуру. Квазічастинкам (електрону, дірці та екситону), які рухались у КТ приписували певну ефективну масу, як і в масивному монокристалі. При цьому ефект розмірного квантування пояснювався рухом квазічастинки у потенціальній ямі нескінченної глибини, якою була КТ [1-5].

Питання про коректність такого підходу, межі його застосовності з боку малих розмірів a КТ та зміну параметрів монокристала при переході до розмірів a квантових масштабів залишаються неповністю розв'язаними.

2. У рамках простої моделі квазінульвимірної системи показано [1; 5; 9], що навіть для КТ CdS з малими радіусами $a = 1,5$ нм кінетична енергія електрона дає у спектр екситону $E_{n_e,0,0}^{th}(a)$ (де n_e, t_h – головні квантові числа електрона і дірки) внесок за порядком величини сумірний із внесками, які вносять у спектр екситону енергії поляризаційної $\bar{U}_{pol}^{n_e,0,0}(a)$ і кулонівської $\bar{V}_{eh}^{n_e,0,0,t_h}(a)$ взаємодій. У зв'язку з цим подання спектра екситону в КТ з радіусами $a < a_{ex}$ (де a_{ex} – борівський радіус екситона в масивному напівпровіднику) лише виразом для кінетичної енергії електрона $T_{nl}^e(a)$ є не зовсім виправданим. Актуальним було б перевірити співвідношення між цими внесками, що входять у спектр екситону у КТ, яка містять не лише напівпровідниковий матеріал CdS.

3. Вирази, що описують спектри квазічастинок $E_{nl}^{e(h)}(a)$ у КТ, значною мірою залежать від виду функції розподілу КТ за радіусами a [1-9]. Важливо було б перевірити на експерименті, які функції розподілу (крім функції Ліфшиця-Слезова) описують розподіл КТ за радіусами a . Теоретичними методами актуально було б з'ясувати, яким чином вирази, що описують енергетичні спектри квазічастинок $E_{nl}^{e(h)}(a)$ у КТ, залежать від таких функцій розподілу.

4. Проблема коректного врахування взаємодії носіїв заряду з самоіндукованим полем поляризації на поверхні поділу КТ-діелектрична матриця залишається актуальною і потребує подальших теоретичних досліджень [1; 2; 14-16]. Зокрема, досі ще не розв'язані задачі щодо усунення сингулярності кулонівського типу в енергії поляризаційної взаємодії $U(r_e, r_h, a)$ квазічастинок зі сферичною поверхнею КТ при $r_e, r_h \rightarrow a$ (де r_e, r_h – відстань електрону і дірки від центру КТ). Також не розв'язана задача, яка б уможливила урахувати плавний перехід діелектричної проникності $\varepsilon(r)$, як функції координати r , через поверхню поділу "КТ-діелектрична матриця" при розрахунках спектрів квазічастинок у квазінульвимірних системах [1].

5. У теоретичних розрахунках спектрів квазічастинок $E_{nk}^{e(h)}(a)$ у рамках моделі зі скінченною глибиною потенціальної ями КТ виникає проблема врахування ефективних мас квазічастинок, як

функцій їх координат ($m_e = m_e(r_e)$ і $m_h = m_h(r_h)$) [21; 22]. Ця задача є ще й досі не розв'язаною для монотонно плавних функцій $m_e(r_e)$ і $m_h(r_h)$ [2].

6. Однією з переваг наноструктур з КТ є те, що КТ можуть бути активними центрами локалізації та рекомбінації носіїв заряду [1-9], що перешкоджає їх безвипромінювальній рекомбінації на дзеркалах резонатора напівпровідникового лазера. Тому особливу увагу приділяють дослідженням процесів деградації властивостей КТ під дією світла. Тут необхідно не лише нові дослідження, зокрема поверхневих станів квазічастинок, резонансно-тунельних ефектів та ефектів фотоіонізації КТ, але й розробка фізичних моделей процесів, що протікають за безпосередньої участі гетерограниці.

Є надія, що в найближчому майбутньому будуть створені масиви КТ з високою концентрацією, ступенем просторової впорядкованості та максимально вузьким розподілом їх розмірів [1-9]. Такі дослідження перебувають на початковій стадії. Створення вертикально зв'язаних масивів самоорганізованих КТ, очевидно, є першим кроком до розробки принципово нового об'єкта досліджень – одновимірних надграток [1-4]. Розробка методів синтезу просторово орієнтованих масивів анізотропних КТ найближчим часом стане новим кроком на шляху отримання наногетероструктур із наперед заданими параметрами. Такими методами були реалізовані ідеальні гетероструктури з КТ із високим ступенем кристалічної досконалості та однорідності за розмірами ($\approx 10\%$). Такі нові наноструктури, очевидно, можуть бути використані для розробки нових нелінійних оптичних поляризаційних пристроїв [20].

7. Практично всі теоретичні та експериментальні дослідження наногетеросистем, виконані до останніх років, належать до так званих закритих систем, в яких зовнішнє середовище є найвищим потенціальним бар'єром. Тепер експериментально створено так звані відкриті наногетеросистеми, в яких зовнішнє середовище створює для квазічастинок потенціальний бар'єр меншої висоти, ніж хоча б один із шарів цієї системи. У [23] вперше було показано, що у таких наносистемах можливе існування квазістаціонарних резонансних станів носіїв заряду. Теорія таких резонансних станів перебуває на початковій стадії розвитку. Завдяки значному збільшенню енергії зв'язку екситонних переходів [23; 24] (у порівнянні з такими ж величинами у "закритих" системах) у "відкритих" наногетеросистемах, такі гетероструктури можуть бути застосованими як елементарна база (квантові транзистори) комп'ютерів нових поколінь [1-9].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Покутний С.І. Теория экситонов в квазиульмерных полупроводниковых системах. – Одесса: Астропринт, 2003. – 230 с.
2. Ткач М.В. Квазічастинки у наногетеросистемах. Квантові точки та дрони. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2003. – 320 с.
3. Шпак А.П., Покутний С.І. Діагностика наносистем. Напівпровідникові квазінульвимірні системи. – Київ: Інститут металофізики НАНУ, 2004. – 320 с.
4. Шпак А.П., Покутний С.І. Спектроскопія електронних і екситонних состояний в низкоразмерных системах. – Киев: Академперіодика, 2005. – 320 с.
5. Шпак А.П., Покутний С.І. // УФМ. – 2005. – 6, № 2. – С. 105-134. [Progr. Phys. Metals. – 2005. – 6, № 2. – Р. 105-134.
6. Шпак А.П., Покутний С.І., Куницький Ю.А. // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2005. – 3, № 3. – С. 667-690.
7. Шпак А.П., Покутний С.І., Куницький Ю.А. // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2005. – 3, № 4. – С. 877-892.
8. Шпак А.П., Покутний С.І., Куницький Ю.А. Коллоидно-химические основы наноауки. – Киев: Академперіодика, 2005, гл. IX.
9. S.I. Pokutnyi. // Ukr. J. Phys. Rev. – 2006. – 3, № 1. – Р. 46-69.
10. Дейген М.Ф., Глинчук М.Д. // ФТТ. – 1963. – 5, № 11. – С. 3250-3258.
11. Лисица М.П., Кулиш Н.Р., Геец В.И., Коваль П.Н. // Опт. и спектр. – 1966. – 20. – № 3. – С. 508-520.
12. Агранович В.М., Лозовик Ю.Е. // Письма в ЖЭТФ. – 1973. – 17, № 4. – С. 209-211.
13. Litovchenko V.G. // Thin Sol. Films. – 1976. – 36, № 1. – Р. 205-213.
14. Pokutnyi S.I. Preprint Akad. Sc. USSR, Institute spectroscopy, № 1. – Moscow, 1984.
15. Покутний С.І. // ФТТ. – 1985. – 27, № 1. – С. 48-56. [Phys. Sol. Stat. – 1985. – 27, №1. – Р. 27-35].
16. Ткач Н.В., Головацкий В.А. // ФТТ. – 1990. – 32, № 8. – С. 2512-2513.
17. S.I. Pokutnyi // Phys. Lett. A. – 1992. – 168, № 5, 6. – Р. 433-436.
18. S.I. Pokutnyi // Phys. Lett. A. – 1995. – 203, № 5, 6. – Р. 388-394.
19. S.I. Pokutnyi // Phys. Lett. A. – 2005. – 342. – Р. 347-350.
20. S.I. Pokutnyi // J. Appl. Phys. – 2004. – 98, № 2. – Р. 1115-1122.
21. S.I. Pokutnyi // Semiconductors. – 2007. – № 11.

22. S.I. Pokutnyi. // Ukr. I. Phys. – 2007. – № 9.
23. Ефремов Н.А., Покутний С.И. // ФТТ. – 1991. – 33, № 10. – С. 2845-2851.
24. Покутний С.И. // ФТП. – 1997. – 39, № 4. – С. 720-722.

Матеріал надійшов до редакції 17.01. 2008 р.

Покутний С.И., Франовский А.Ц., Ткаченко А.К. Покутний М.С. Оптическая спектроскопия экситонных состояний в квазиульмерных системах: современное состояние и перспективы развития. Вклад украинских физиков.

Анализируется современное состояние и перспективы развития оптической спектроскопии полупроводниковых наносистем. Приводятся проблемы теоретической спектроскопии электронных и экситонных состояний квазиульмерных наносистем, которые требуют дальнейшего развития.

Pokutnyi S.I., Franovsky A. Ts., Tkachenko O.K. Pokutnyi M.S. Optical Spectroscopy Excision States in Quasi-zero-dimensional Systems: Modern States and Perspective Development. Ukrainian Physics Contributions.

The modern condition and the perspectives of the development of optical spectroscopy semiconductor nanosystems is analysed. The problems of theoretical electronic and excision states of guasi-zero dimelsional nanosystems spectrocrepys with future development are provided.